

0 7 2 1 7 3 2 - 1

на правах рукописи

**БИКМУРЗИН АЙРАТ РИНАТОВИЧ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
РАЗДЕЛЕНИЯ В НЕФТЕХИМИИ СОВМЕСТНО  
С СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ**

**05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Казань – 2001**

Работа выполнена в Казанском государственном технологическом университете.

Научный руководитель	— доктор технических наук, профессор Э.Ш.Теляков
Официальные оппоненты	— доктор химических наук, профессор Г.С.Дьяконов
	— кандидат технических наук, доцент Б.Н.Матюшко
Ведущая организация	— ЗАО НПП "ПРОМАВТОМАТИКА"

Защита диссертации состоится " 8 " июня 2001 года в 14<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г.Казань, ул.К.Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета (А-330).

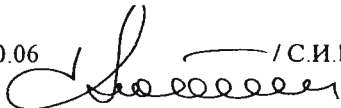
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан " 2 " мая 2001 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.080.06

 / С.И.Пони́каров /



Актуальность темы. Для решения задач проектирования химико-технологических систем (ХТС), а также их анализа (оптимизация, управление, создание гибких автоматизированных производств) все большее применение находят системы автоматизированного проектирования (САПР) ХТС. По современным представлениям проектирование ХТС и систем управления должно проводиться совместно, поскольку и ХТС, и система управления представляют собой единый сложный объект. Однако в большинстве случаев проектирование ХТС и АСУ ТП выполняется разными САПР и даже разными специалистами. Математические модели машин и аппаратов ХТС и элементов систем управления (приборы, датчики, регуляторы, ...) разработаны без учета их реального взаимодействия в структурах ХТС. Интегрирование в ХТС систем управления, в свою очередь, накладывает необходимость использования в САПР динамических математических моделей (ДММ), что в большинстве случаев не выполняется.

Тенденции развития нефтехимических и химических производств характеризуются возрастанием единичной мощности отдельных установок и агрегатов, усложнением технологических схем, использованием термодинамического усовершенствования схем разделения, что проявляется в появлении рецикловых потоков (обратных связей). Эти обстоятельства существенно повышают требования к качеству профессиональной подготовки обслуживающего персонала предприятий, к улучшению системы обучения, ее ориентации на достижения науки в области учебно-методических разработок и на широкое использование современных информационных технологий, в том числе и электронных тренажеров.

Единой основой решения задач проектирования, управления и обучения является аппарат адекватного математического моделирования как статике, так и динамики ТП. Эти обстоятельства подтверждают актуальность проблемы создания специализированных САПР, ориентированных на разработку ХТС с интегрированными в них АСУ ТП, основанными на использовании ДММ.

Настоящая работа посвящена проблеме разработки САПР сложной ХТС, моделирующей реальное технологическое оборудование ХТС и реальные физико-химические процессы, протекающие в моделируемом оборудовании, а также интегрирующей в себя систему управления процессом. Используемый подход позволяет моделировать ХТС произвольного уровня сложности, а также воспроизводить переходные процессы в ХТС.

#### Цель работы:

1. Разработка системы автоматизированного проектирования ХТС совместно с интегрированной в ХТС системой управления.
2. Разработка наборов ДММ объектов химической технологии разного уровня сложности, учитывающих требования, предъявляемые конкретной задачей.

3. Совершенствование элементов АСУ ТП.

4. Идентификация упрощенных ММ типовых процессов химической технологии по сложным ММ этих процессов.

5. Разработка компьютерного тренажера оператора химических объектов.

#### Научная новизна.

1. Разработана инструментальная база САПР, основанной на объектно-ориентированном подходе и совместном использовании моделей динамики процессов разделения и систем управления процессами.

2. Предложен подход, описывающий динамику процессов теплообмена с прямотоком и противотоком теплоносителей, с произвольным количеством потоков, представляющих в общем случае многокомпонентную смесь (МКС).

3. Предложен новый механизм ПД-регулирования с адаптивной позицией, обладающий свойством универсальности и имеющий определенные преимущества перед традиционным универсальным механизмом ПИД-регулирования.

4. Предложена методика расчета термодинамического состояния МКС, находящейся в аппарате с фиксированным объемом, позволяющая определять параметры состояния системы: давление, составы и температуры фаз.

#### Практическая ценность.

1. Разработанная система визуального проектирования ХТС совместно с АСУ, содержащая в себе набор ДММ, оформлена в виде программы-приложения, позволяет пользователю со знаниями и навыками на инженерном уровне в интерактивном режиме конструировать технологическую схему, используя набор встроенных объектов химической технологии и расставляя связи между ними.

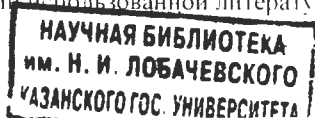
2. Разработанная САПР использована при разработке проекта реконструкции блока вакуумной ректификации побочных гликолей для ОАО "Казаньоргсинтез".

3. На базе разработанной ММ разработан компьютерный тренажер оператора-технолога ХТС для завода "Этилен-450" ОАО "Нижнекамскнефтехим".

Соответствующие акты внедрения прилагаются к работе.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты докладывались на: V международной конференции по интенсификации нефтехимических процессов "Нефтехимия-99", Нижнекамск, 1999 г.; V международной научной конференции "Методы кибернетики химико-технологических процессов КХТП-V-99", Казань, 1999 г.; международной конференции "Тепло- и массообмен в химической технологии", Казань, 2000 г.; научно-технических конференциях КГТУ в 1998-2000 гг. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ и выполнены 2 отчета по научно-исследовательским разработкам.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения, содержит 163 страницы машинописного текста, 43 рисунка, 169 наименований использованной литературы, 13 страниц приложения.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель исследования, кратко изложено содержание работы.

В первой главе проведен обзор теории управления, ее современного состояния и направлений дальнейшего развития. На примере ряда промышленных предприятий рассматривается текущий технический уровень АСУ ТП.

Показано, что в большинстве случаев задачи проектирования ТП и АСУ ТП рассматриваются отдельно друг от друга.

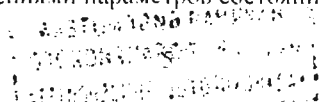
Вкратце рассмотрены области практического использования ДММ.

Сделан вывод о том, что для обучения и тренировки персонала, обслуживающего взрывопожароопасные химические объекты, существует необходимость разработки компьютерных тренажеров, основанных на реальных ДММ и имитирующих штатные и внештатные состояния ХТС.

Во второй главе рассмотрены вопросы имитационного математического моделирования ХТС, представляющей собой многоуровневую, иерархически оформленную структуру из взаимодействующих друг с другом технологических объектов. Для программного описания такой структуры чрезвычайно удобно применять языки программирования высокого уровня, использующие концепцию модульного и объектно-ориентированного программирования (ООП-модель) и оперирующие объектами типами данных. Поэтому ДММ была программно реализована на языке ООП *Object Pascal* в среде визуального программирования *Delphi*, и все объекты ХТС конструировались на базе объектного типа данных, позволяющего создавать объекты любой сложности, с возможностью их визуализации.

К объектам ХТС относится основное и вспомогательное оборудование (массообменные колонны, теплообменники, насосы, контактные устройства, емкости, клапаны, измерительные и регулирующие приборы, ...). База данных объектов ХТС является открытой с возможностью пополнения новыми объектами. Аналогичным образом выполнена и пополняется база данных физико-химических свойств, а также методов их расчета. Структура объекта ХТС представлена на рис. 1.

Внутри объекта ХТС находится другой объект, определяемый как поток. В то время как объект ХТС моделирует различные аппараты, объект-поток моделирует материальный и информационный потоки и все происходящие с ними изменения. В объекте-потоке имеется набор функций по обработке потоков (сложение, деление, обнуление, расчет равновесия и т.д.), а также описание фаз смеси: мольные и массовые доли и расходы компонентов, энтальпия, объем, температура и скорость фазы. В параметрах материального потока содержится вся необходимая информация о состоянии системы. Материальные потоки, поступающие и отходящие из каждого элемента ХТС, в общем случае являются многофазными, а их состояние полностью определено текущими значениями параметров состояния.



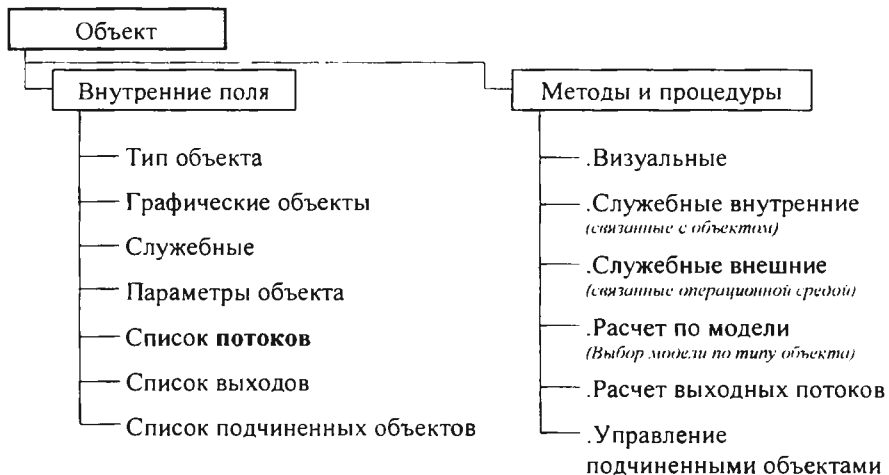


Рис. 1. Структура объекта ХТС

Математическое описание процесса взаимодействия двухфазной системы в элементе ХТС (контактные устройства, теплообменники) включает в себя уравнения общего и покомпонентных материальных балансов системы:

$$\frac{d(w + W)}{d\tau} = \sum_j (L_j + G_j) - \sum_k (L_k + G_k) \quad (1)$$

$$\frac{d(w_i + W_i)}{d\tau} = \sum_j (L_j x_{ji} + G_j y_{ji}) - \sum_k (L_k x_{ki} + G_k y_{ki}) \quad (2)$$

уравнение теплового баланса:

$$\frac{d(wh + WH)}{d\tau} = \sum_j (L_j h_j + G_j H_j) + \sum_k (L_k h_k + G_k H_k) \quad (3)$$

уравнения, связывающие между собой составы паровой и жидкой фаз:

$$y_i = K_i x_i \quad (4) \quad \text{и уравнения нормировки: } \sum_{i=1}^N x_i = I; \quad \sum_{i=1}^N y_i = I \quad (5)$$

Уравнения (1)–(3) записаны в дифференциальной форме. Для ДММ осуществляется переход к конечным разностям:

$$w^k + W^k - w^n - W^n = \sum_j (L_j + G_j) \Delta\tau - \sum_k (L_k + G_k) \Delta\tau \quad (6)$$

$$w_i^k + W_i^k - w_i^n - W_i^n = \sum_j (L_j x_{ji} + G_j y_{ji}) \Delta\tau - \sum_k (L_k x_{ki} + G_k y_{ki}) \Delta\tau \quad (7)$$

$$w^k h_k + W^k H_k - w^n h_n - W^n H_n = \sum_j (L_j h_j + G_j H_j) \Delta\tau - \sum_k (L_k h_k + G_k H_k) \Delta\tau \quad (8)$$

В этом случае величина  $\Delta\tau$  становится параметром настройки ДММ. Параметр  $\Delta\tau$  определяет квазистационарный период, в течение которого входные и выходные потоки не зависят от времени. Очевидно, чем короче  $\Delta\tau$ , тем меньшие погрешности будут вноситься в результаты моделирования.

Обозначив  $L^k = w^k + \sum_k L_k \Delta \tau$ ,  $L'' = w'' + \sum_j L_j \Delta \tau$ , и выполнив такие же обозначения для газовой фазы и покомпонентно для обеих фаз, получим:

$$L'' + G'' = L^k + G^k = Z \quad (9); \quad L_i'' + G_i'' = L_i^k + G_i^k = Z_i \quad (10)$$

Обозначив  $h^k = (w^k h_k + \sum_k L_k h_k \Delta \tau) / L^k$ ,  $h'' = (w'' h'' + \sum_j L_j h_j \Delta \tau) / L''$ , и выполнив аналогичные обозначения для газовой фазы, также получим:

$$L'' h'' + G'' H'' = L^k h^k + G^k H^k = q'' + Q'' = q^k + Q^k \quad (11)$$

Для замыкания математического описания система уравнений (4), (5), (9)–(11) также должна быть дополнена уравнениями, раскрывающими механизм задержки ПЖС на контактном элементе ХТС (удерживающая способность элемента ХТС по жидкости и по пару, гидравлическое сопротивление):

$$w, W = f(\Gamma, Re, Gr, \Delta P, \dots) \quad (12)$$

а также учитывать кинетические особенности процесса взаимодействия фаз, которые предлагается осуществить либо с помощью уравнений сопряженного тепло- и массообмена:

$$(N^y) = \frac{d}{dF} (GY) = [B^y] (Y_f - \bar{Y}) - p N_o (Y_f - \bar{Y}) + N_o (Y_f) \quad (13)$$

$$(N^x) = \frac{d}{dF} (LX) = [B^x] (X_f - \bar{X}) + p N_o (X_f - \bar{X}) - N_o (X_f) \quad (14)$$

$$N_i^y = -N_i^x \quad (15); \quad N_o = \sum_{i=1}^n N_i^y = -\sum_{i=1}^n N_i^x \quad (16)$$

$$q^y = \frac{d(GH_c)}{dF} = \alpha^{y*} (t_f - T) - \sum_{i=1}^n p N_i^y (H_{f,i} - H_i) + \sum_{i=1}^n N_i^y H_{f,i} \quad (17)$$

$$q^x = \frac{d(Lh_c)}{dF} = \alpha^{x*} (t_f - t) - \sum_{i=1}^n p N_i^x (h_{f,i} - h_i) + \sum_{i=1}^n N_i^x h_{f,i} \quad (18)$$

$$(Y_f) = [K](X_f) \quad (19); \quad q^y = -q^x = q \quad (20)$$

либо с помощью тепло- и массообменной эффективностями взаимодействия фаз:

$$\eta_i^M = \frac{G^k y_i^k - G'' y_i''}{G^k y_i^k - G'' y_i''} = \frac{L^k x_i^k - L'' x_i''}{L^k x_i^k - L'' x_i''} = \eta^M = \frac{G^k - G''}{G^k - G''} = \frac{L^k - L''}{L^k - L''} \quad (21)$$

$$\eta^T = \frac{Q^k - Q''}{Q^k - Q''} = \frac{q^k - q''}{q^k - q''} \quad (22)$$

Во втором случае предполагается, что тепло- и массообменная эффективности равны между собой, и тепломассообменная эффективность является параметром настройки ММ. Второй способ для целей динамики представляется более предпочтительным в связи с требованиями по скорости счета.

Далее рассматривается ДММ теплообменника с балансовым перераспределением энергии между взаимодействующими потоками, число которых не лимитировано. Подход к описанию динамики теплообмена предлагается сделать по аналогии

с динамикой сопряженного массо- и теплообмена, используя в качестве параметра настройки объекта эффективность теплообмена.

Для этого в течение периода времени  $[t; t+\Delta t]$  элемент ХТС рассматривается как замкнутая система. Для рассматриваемой замкнутой системы находится равновесное состояние этой системы. Зная начальное и равновесное состояния системы и используя эффективность взаимодействия, вычисляется конечное состояние системы в момент времени  $t + \Delta t$ . В соответствии с этим в начальной точке отсчета времени  $t$  имеем:

$$\sum_j (\dot{L}_j'' h_j'' + \dot{G}_j'' H_j'') = \sum_j (\dot{q}_j'' + \dot{Q}_j'') = \sum_j I_j''(T_j'') = I \quad (23)$$

С течением времени система перейдет в равновесное состояние, характеризующееся отсутствием движущих сил между потоками, которые имеют в этом случае одинаковую температуру  $T^*$ :

$$\sum_j (\dot{L}_j' h_j' + \dot{G}_j' H_j') = \sum_j (\dot{q}_j' + \dot{Q}_j') = \sum_j I_j'(T^*) = I \quad (24)$$

Из совместного решения уравнений (23)–(24) находится  $T^*$ :

$$f(T^*) = \sum_j (\dot{I}_j'(T^*) - I_j''(T_j'')) = 0 \quad (25)$$

Задав теплообменную эффективность, находится конечная энергия потоков:

$$\eta = \frac{I_j^* - I_j''}{I_j' - I_j''} \quad (26)$$

Зная конечную энергию потока, и, учитывая, что в общем случае поток представляет собой ПЖС, для каждого потока вычисляется расчет его фазового состояния по выражениям (4), (5), (9)–(11). Рассмотренный подход применим для аппаратов с произвольным направлением взаимодействующих потоков (прямоток, противоток).

Ряд объектов ХТС (емкости, вакуум создающие системы (ВСС), ...) работают в условиях фиксированного объема. В этом случае при расчете фазового равновесия системы искомыми переменными являются: доля отгона  $E^* = G^* / (L^* + G^*)$ , температура  $T^*$  и давление  $P_{ГЕОМ}$  в фиксированном объеме пространства  $V_{ГЕОМ}$ . В работе предложена методика расчета такой схемы фазового взаимодействия. На рис.2. показан пример применения разработанной методики. Емкость адиабатически заполняется смесью газов: метан, этан, пропан в составе 25%, 30%, 45% массовых соответственно при начальном давлении, равном атмосферному ( $P_{н,г} = 0$ ) и начальной температуре  $-20^\circ\text{C}$ . Процесс нагнетания газа в емкость будет сопровождаться ростом давления, изменением температуры и образованием конденсата переменного состава.

Принципиально важным в описании ДММ является организация расчета ХТС, поведение объектов которой рассчитывается по моделям в течение заданного периода времени. После этого производится расчет выходных параметров для всех объектов ХТС, формирование и распределение выходных потоков, отображение



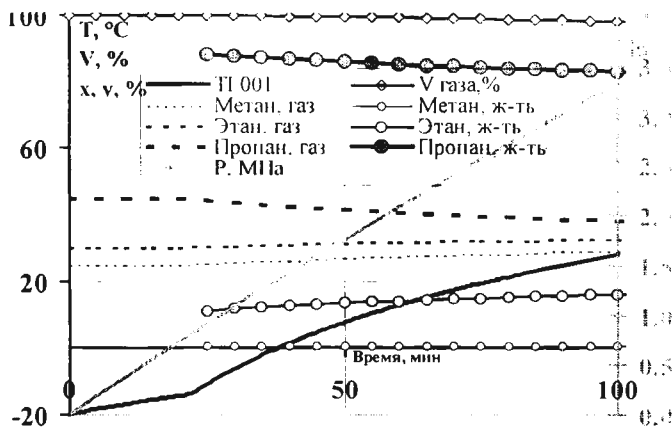


Рис. 2. Изменение параметров системы: емкость, заполняемая газом

(визуализация) произошедших изменений.

На рис.3. в упрощенном виде показан принцип организации расчета при имитационном моделировании ХТС.

Из рисунка видно, что методы 1 и 2 (условные названия) содержат в себе вызовы

самих себя, но они уже вызываются объектами из списка подчиненных. Такой рекурсивный вызов (на рисунке он подчеркнут волнистой линией) позволяет всем объектам ХТС сначала осуществить расчет по индивидуальным моделям, и только затем реализовать формирование и распределение выходных потоков опять же для всех объектов ХТС. После этого выполняется пересчет времени, и затем – вызов основной процедуры расчета. Такой принцип организации расчета, позволяет качественно воспроизводить переходные процессы в системе, в то время как, например, при потарелочном расчете ректификационной колонны, изменение в параметрах питания приводит к распространению возмущения по всей колонне сразу за первый проход основной процедуры расчета ХТС.

При разработке математической модели сложного объекта, каким является ХТС, большое значение уделялось визуальному отображению объекта на экране, повышающего, таким образом, его информативность и наглядность. В связи с этим разработанная ДММ была "настроена" графической оболочкой. Совокупность ДММ и графического интерфейса представляет собой компьютерную модель. Созданная программа-приложение была названа "Система визуального проектирования ХТС". Основное назначение графической оболочки – облегчить

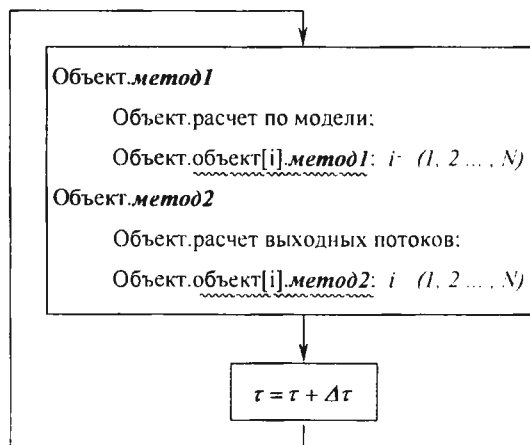


Рис. 3. Принцип организации расчета динамики ХТС

диалог пользователя с приложением, автоматизировать его труд. Внешним видом математической модели ХТС является технологическая схема узла, которую пользователь собирает сам, выбирая объекты и модели для их расчета из базы данных, составляя их и проводя связи между ними. На рис.4. изображен внешний вид основного окна приложения с собранной ХТС.

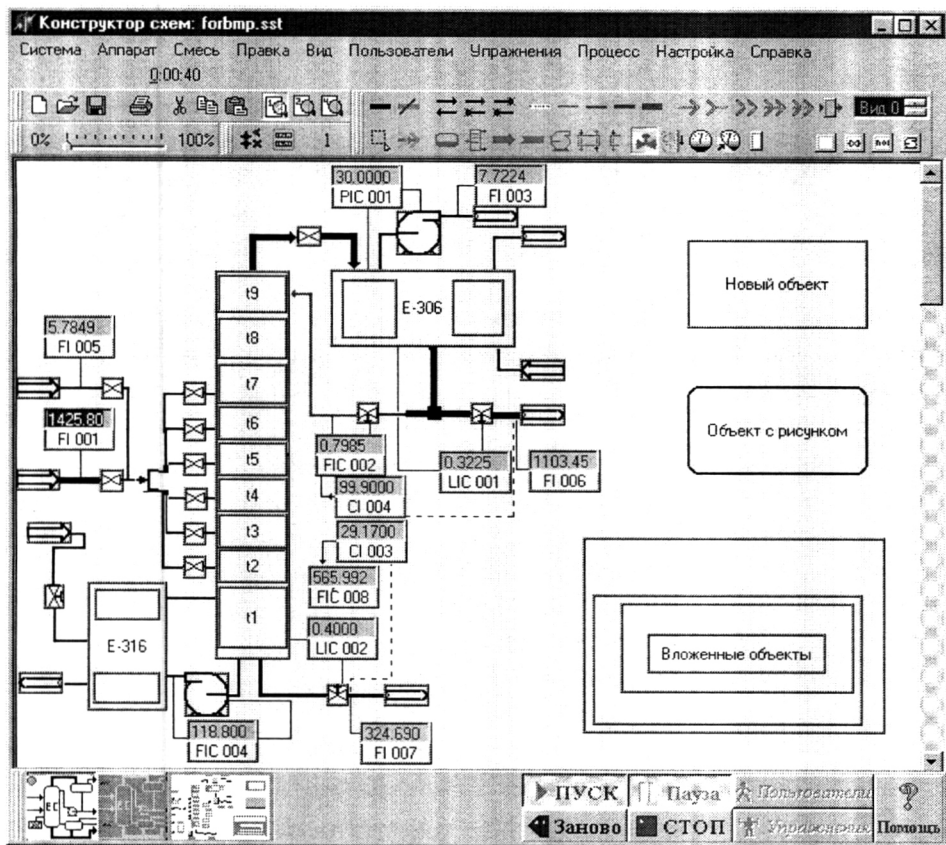


Рис.4. Внешний вид основного окна приложения с загруженной ХТС

Графическое отображение ХТС формируется в соответствии с принципом избыточности информации, повышая, таким образом, помехоустойчивость, наглядность и информативность самой системы, поскольку в любой момент времени можно получить доступ практически ко всем параметрам объекта. Это позволяет выявить ошибки в работе как самой программы, так и отклонения от нормального функционирования ХТС на самой ранней стадии их проявления.

Отдельно стоит остановиться на отображении приборов, поскольку для них наиболее ярко проявляется эффект от визуализации. В дополнение к стандартному виду дополнительно используется сложный визуальный объект, симулирующий переднюю панель реального прибора. Передняя панель прибора-объекта несет в себе

функциональную нагрузку: кнопки, переключатели, индикаторы, стрелки, указатели. На рис.5. изображены объекты, имитирующие внешне и функционально передние панели двух приборов-регуляторов: электрический *Taylor Mod 30* и пневматический *ICE Yokogawa*.

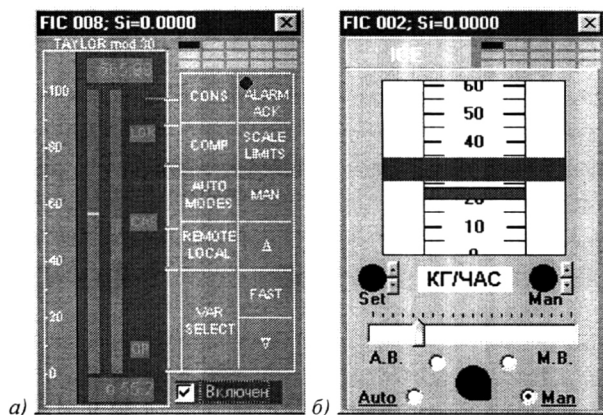


Рис.5. Имитация передних панелей приборов-регуляторов:  
а) электрический Taylor Mod 30; б) пневматический Yokogawa

Автоматический регулятор является базовым элементом АСУ. В нашем случае рассматриваются цифровые АСУ. С помощью автоматического регулятора обеспечивается автоматическое поддержание технологического параметра в окрестностях заданного значения. Математическое описание регулятора должно включать в себя следующие условные бло-

ки: механизмы регулирования, механизмы обработки сигналов (ограничения и контроль), управление регулятором пользователем или другим регулятором, а также визуализация приборной части автоматического регулятора.

В АСУ, используемых на химических объектах, в основном применяются регуляторы, реализующие классический ПИД закон регулирования:

$$X_{PEГ} = K_{П} Y_m + \frac{\Delta T}{T_{И}} \sum_{i=0}^m Y_i + \frac{T_{Д}}{\Delta T} (Y_m - Y_{m-1}) \quad (27)$$

Способность ПИД-регуляторов управлять объектами, отличающимися по физической природе, свойствам и назначению, свидетельствует об их универсальности. Универсальность таких регуляторов обусловлена самим ПИД-способом формирования управляющего воздействия, но платой за универсальность является потеря качества управления, причем иногда весьма значительная даже при самой квалифицированной настройке. Для повышения качества управления разработаю несколько модификаций ПИД-регуляторов. В данной работе предложено усовершенствование ПИД-алгоритма путем замены интегральной составляющей регулирования на иной механизм. Смысл вклада интегральной составляющей – сведение к нулю статической ошибки регулирования ПД-регулятора. Функционально реализовать это можно и другим способом, но для этого необходимо рассматривать уже не сам механизм регулирования, а механизм работы автоматического регулятора.

Формирование управляющего воздействия  $X_{PEГ}$  регулятора происходит относительно постоянной величины – выходной позиции  $X_0$  самого регулятора:

$$X_{\text{вых}} = X_o + X_{\text{PEI}} \quad (28)$$

Выходная позиция регулятора настраивается технологом в ручном режиме работы прибора. Предлагается ликвидировать статическую ошибку регулирования ПД-регулятора в автоматическом режиме так, как это делает технолог в ручном режиме – за счет адаптации выходной позиции:

$$X_o = X_o + \gamma X_{\text{PEI}} \quad (29)$$

где  $0 < \gamma \leq 1$  – параметр настройки. В этом случае в одном механизме кооперируются стандартный ПД-механизм регулирования и нечеткая логика интеллекта. Сравнительный анализ работы ПД-регулятора с адаптивной позицией и ПИД-регулятора показывает определенные преимущества первого перед вторым, как по времени, так и по качеству регулирования. Наиболее ярко преимущество использования адаптивной позиции проявляется для зависимого каскадного регулятора, у которого задание управляется другим регулятором каскада.

На рис.6. приведены результаты моделирования работы зависимого каскадного регулятора при переходе из одного стационарного режима в другой.

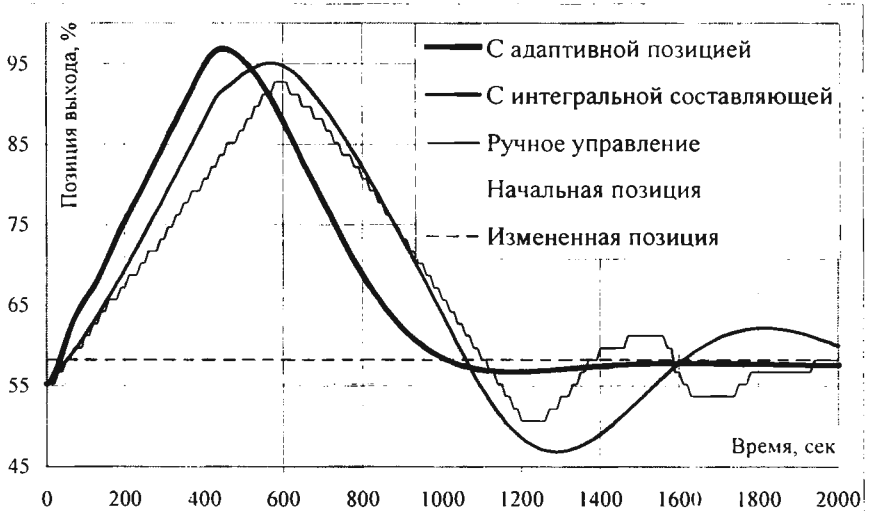


Рис.6. Сравнение работы зависимого каскадного регулятора в переходном процессе

Контур управления состоял из двух регуляторов в каскаде. У первого регулятора уменьшалось задание на поддержание технологической величины на 8%. В результате перехода системы на новый стационарный режим изменялась и выходная позиция зависимого каскадного регулятора.

Рассматривались три варианта зависимого каскадного регулятора: ПИД-регулятор, ПД-регулятор с адаптивной позицией, настройка регулятора в ручном режиме оператором технологом на новое задание. Во всех случаях пропорциональная и дифференциальная составляющие были одними и теми же.

В третьей главе рассматривается применение разработанной ДММ на практике.

Для практического использования ММ необходимо ее приведение в соответствие моделируемому объекту. Критерием адекватности является максимальное соответствие между выходными параметрами математической модели и их опытными значениями.

Существенное влияние на правильность работы ДММ оказывает кинетика тепло-массообменного процесса. С помощью системы визуального проектирования была создана модель ХТС для проведения численных экспериментов по моделированию процесса неізотермической абсорбции. Обработка экспериментальных данных А.Н.Войнова показала, что система уравнений (13)–(20) адекватно описывает процесс неізотермической абсорбции кислорода воздуха водой в широком диапазоне изменения температур воды и воздуха. Неізотермичность процесса приводила в условиях эксперимента к появлению весьма больших поперечных потоков массы за счет испарения (конденсации) воды, причем этот поток на 3-4 порядка превосходил поток массы по кислороду. Показано, что, по крайней мере, для условий эксперимента влияние поперечного потока массы на процесс абсорбции существенно сильнее, чем эффекты многокомпонентного диффузионного взаимодействия. На рис.7–8 представлены результаты модельного эксперимента, которые показывают, что тепло-массообменные эффективности действительно близки между собой, и сохраняются практически постоянными во всем исследованном интервале неізотермичности.

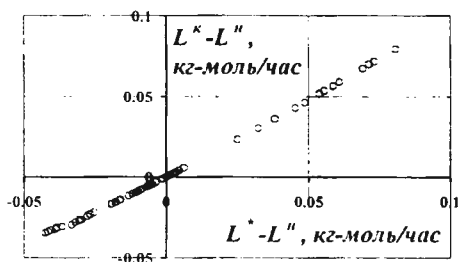


Рис. 7. Зависимость  $(L^k - L^n)$  от  $(L^k - L^n)$

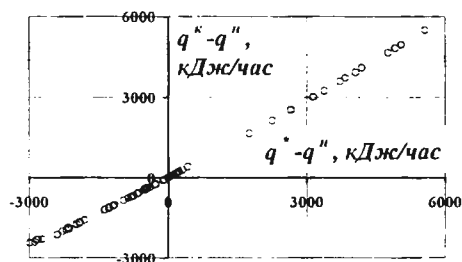


Рис. 8. Зависимость  $(q^k - q^n)$  от  $(q^k - q^n)$

Обработка данных численного эксперимента (табл.1) показала: использование упрощенной ММ привело к снижению точности в 2 раза, что является приемлемым, а также к увеличению скорости счета на два порядка.

Таблица 1.

Учет кинетики в ММ	Средн.кв.откл., мг/литр	Средн.кв.откл., %
Сопряженный массо- теплообмен	0.33	7.1
Тепло-массообменная эффективность	0.72	15.4

Результаты проведенного численного эксперимента показывают, что при моделировании ХТС всегда имеется принципиальная возможность получения информации о тепло-массообменных эффективностях объектов модели путем проведения

исследования разделяемой смеси по более строгим моделям. В качестве эталонных моделей может выступать не только система уравнений (13)–(20), но и другие, например вариационная модель Дьяконова-Лаптева-Елизарова.

Практическое использование САПР было применено при разработке проекта реконструкции блока вакуумного разделения побочных гликолей в Казанском акционерном обществе «Казанский органический синтез» на заводе «Оргпродукты». Разделение побочного гликоля предполагается обеспечить за счет проведения реконструкции простаивающей колонны Т-306, для чего необходимо увеличить ее разделительную способность, а также подобрать основное и вспомогательное оборудование. Для решения поставленной задачи возникла необходимость провести моделирование процесса разделения и обосновать варианты реконструкции колонны Т-306 с учетом ограничений технологического и конструктивного характера, накладываемых на решение производственными условиями. Одновременно ставилось целью и разработать систему управления блоком, что делает необходимым использование ДММ. Исследование было проведено с помощью системы визуального проектирования ХТС. Собранная модельная схема узла приведена на рис.4.

Одним из аспектов ДММ является проблема выбора шага интегрирования  $\Delta t$ , оказывающего значительное влияние на форму переходной кривой. На рис.9. при различных  $\Delta t$  приведены формы переходных кривых, вызванные скачкообразным изменением параметров питания технологического узла (рис.4.). Анализ формы переходных кривых при различных шагах интегрирования показал, что качественно форма остается неизменной, но с увеличением  $\Delta t$  пропорционально растягивается во времени (рис.10). Искажения переходных кривых в пределах 10% можно считать приемлемыми. Поэтому для рассматриваемой в качестве примера системы необходимо соблюдать условие  $\Delta t \leq 1 \text{ сек.}$

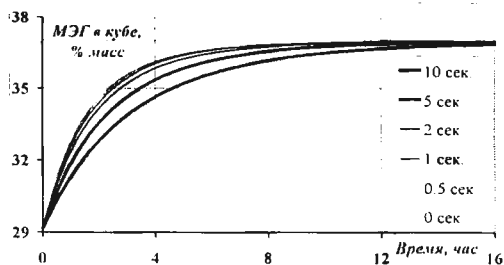


Рис.9. Переходные кривые содержания МЭГ в кубе колонны, вызванные 5%-ым увеличением расхода питания, при различных  $\Delta t$ .

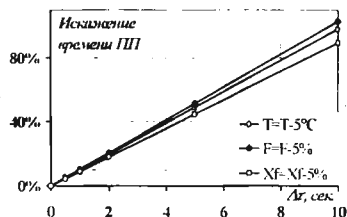


Рис.10. Искажение времени, вызванное конечным значением  $\Delta t$  при различных возмущающих параметрах питания.

В соответствии с техническим заданием были проведены технологические расчеты колонны Т-306. Целью исследования являлся расчет нагрузок по внутренним материальным потокам, необходимых для расчета контактных устройств реконструируемой колонны, и определение параметров технологического режима установ-

ки. В ходе исследования было рассчитано число теоретических тарелок, необходимых для разделения данной смеси. Технологические расчеты были проведены для нескольких конкурирующих режимов работы установки. В каждом варианте расчета фиксировались следующие технологические параметры по колонне: расходы, составы и температуры расходящихся фаз,  $F$ -фактор, плотность орошения. Окончательно был выбран вариант, удовлетворяющий ограничениям по минимальной плотности орошения и  $F$ -фактору для заданного типа насадки. Далее была проведена серия экспериментов, определяющая оптимальное положение тарелки питания, которой оказалась третья снизу.

Кроме того, было проведено моделирование вспомогательного оборудования (дефлегматор, кипятильник, ВСС), и подтверждена работоспособность оборудования, предложенного заводом.

На следующем этапе на ДММ была проведена серия численных экспериментов для определения контрольного сечения колонны, используемого для целей управления. Результаты показали, что ниже точки ввода питания областей постоянства температуры при внесении внешних возмущений не существует, а выше точки ввода питания профиль температур практически не зависит от возмущения. Нижняя секция колонны работает в режиме нечеткого разделения (МЭГ), поэтому единственным сечением, на котором выдерживается постоянство температуры при внесении внешних возмущений оказывается куб колонны. Расчеты показали, что изменению концентрации МЭГа на  $\pm 2\%$  массовых соответствует линейное изменение температуры в кубе на  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Таким образом, содержание МЭГа в кубе колонны достаточно легко контролировать по температуре в кубе, естественно при условии стабилизации давления в аппарате. Для выполнения этой цели в технологическую схему был добавлен контур для поддержания давления в колонне за счет подачи инерта (азота) в шлемовую линию аппарата.

Для целей компенсации возмущений предложен контур с отрицательной коррекцией задания уровня в кубе в зависимости от температуры в кубе: регулятор  $TIC\ 002$  на рис. 11.а. Смысл корректировки уровня в кубе состоит в изменении отбора из куба во время переходного процесса. При коррекции с отрицательной обратной связью (ООС) получается, что отбор из куба становится меньше среднего значения при некондиционном качестве продукта (в этом случае понижается температура, а задание уровня в кубе соответственно увеличивается – отбор падает), и наоборот, рис. 11.б. В этом случае усредненное за переходный период качество кубового продукта в случае с отрицательной коррекцией задания уровня в кубе в зависимости от температуры куба будет лучше, чем в случае отсутствия коррекции, рис. 11.в. Переходный процесс был вызван увеличением расхода питания на  $10\%$  и уменьшением температуры на  $10^\circ\text{C}$ .



а) Коррекция по температуре в кубе регулятором TIC002 задания регулятора LIC001, регулирующего уровень в кубе.

б) Изменение отбора из куба в зависимости от температуры (качества продукта) в кубовой жидкости.

в) Накопительное изменение доли МЭГ в кубовом продукте при изменении параметров питания.

Рис. 11. Улучшение качества нижнего продукта за счет временного изменения уровня в кубе

Разработанная схема реконструкции блока совместно с системой управления представлена на рис. 12.

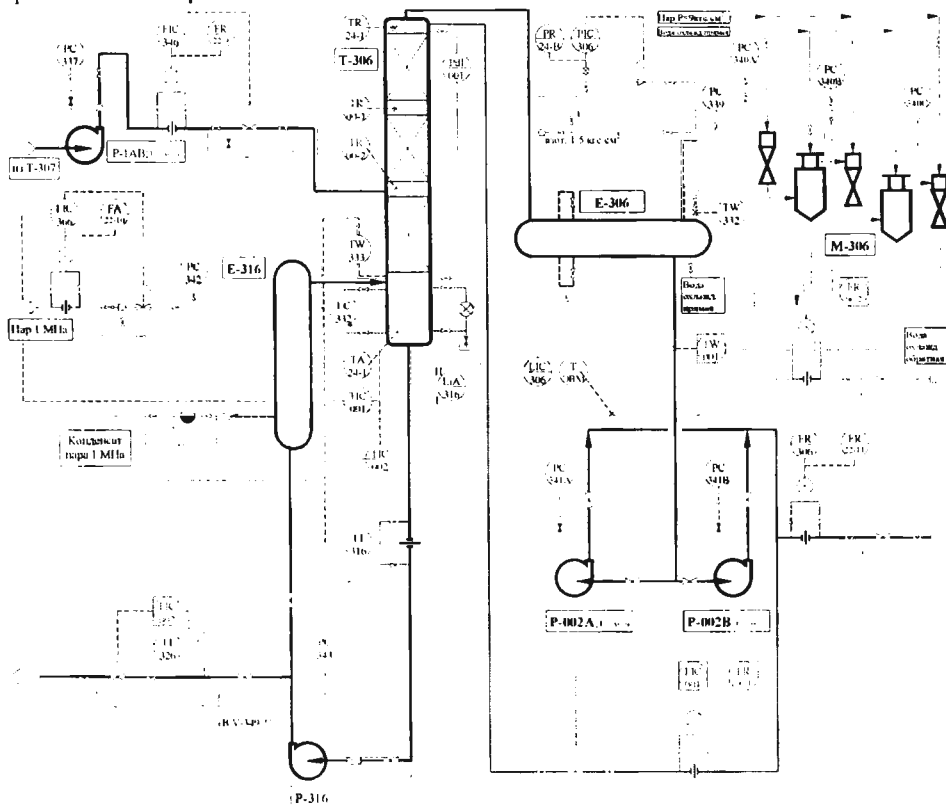


Рис. 12. Схема узла после реконструкции

Поскольку разработанная математическая модель ХТС, включающей в себя также и АСУ ТП позволяет имитировать практически любое состояние производственного объекта, будь это пуско-наладочные процедуры, или же аварийная ситуа-



ция, то еще одним практическим применением ДММ является создание компьютерного тренажера оператора-технолога установки, представляющий собой отдельное оконное приложение.

На рис.13. изображен внешний вид компьютерного тренажера, разработанного для учебного центра и завода "Этилен-450" ОАО "Нижнекамскнефтехим", включающий в себя пять узлов ректификации.

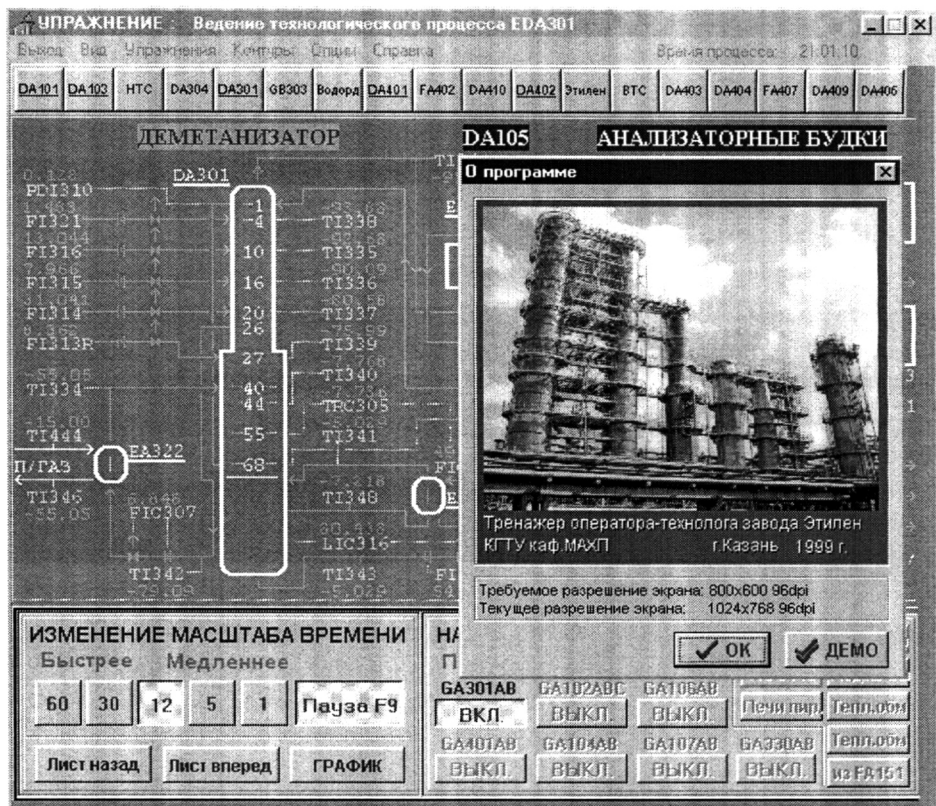


Рис.13. Внешний вид программы "Компьютерный тренажер оператора-технолога"

Графический интерфейс электронного тренажера описывает следующие типовые элементы: схема технологического узла, автоматизированное рабочее место оператора-технолога, внешний вид приборов, панель выбора упражнений, интерфейсные элементы стандартного Window's-приложения, окна настройки и свойств объектов. Для функционирования тренажера необходимо также разработать типовые упражнения, которые содержат набор базовых упражнений для отработки навыков по эксплуатации отдельных приборов и аппаратов ХТС, а также набор тестовых упражнений, созданных на основе данных технологического регламента, имитирующие технологический узел, на котором отрабатываются такие операции, как пуск и останов узла, ведение технологического процесса, ликвидация аварийных си-

туаций.

В электронном тренажере также содержится экспертная система оценки работы пользователя: по заданным критериям определяется эффективность и правильность работы пользователя. Критериями оценки работы пользователя могут быть, например, качество выходного продукта, время выполнения задания и др.

По технологическому узлу, приведенному на рисунке, была проведена идентификация ДММ применительно к процессу ректификации при больших давлениях.

### ВЫВОДЫ

1. Разработана система визуального проектирования ХТС.
2. Разработана инструментальная база, включающая в себя набор моделей аппаратов и типовых процессов разделения химической технологии.
3. Поведение ХТС моделируется совместно с системой управления, являющейся неотъемлемой частью ХТС.
4. Предложен подход, описывающий динамику процессов теплообмена с прямотоком и противотоком теплоносителей, с произвольным количеством потоков, представляющих в общем случае многокомпонентную смесь.
5. Предложена методика расчета термодинамического состояния МКС, находящейся в фиксированном объеме с поиском параметров состояния системы: давление, составы фаз и температура.
6. Предложен новый механизм ПД-регулирования с адаптивной позицией, обладающий свойством универсальности и имеющий определенные преимущества перед традиционным универсальным механизмом ПИД-регулирования.
7. Показано, что при моделировании процесса разделения всегда имеется принципиальная возможность получения информации о тепло-массообменных эффектах объектов модели путем проведения исследования разделяемой смеси по более строгим моделям.
8. Разработанная компьютерная модель использовалась в качестве исследовательской системы при разработке проекта реконструкции колонны Т-306 завода "Оргпродукты" ОАО "Казаньоргсинтез". Проведен совместный расчет и анализ реконструируемой колонны, сопутствующего оборудования и системы управления технологическим узлом с целью поиска оптимальных параметров.
9. На базе разработанной математической модели в виде отдельной программы-приложения создан компьютерный тренажер оператора-технолога для пяти узлов ректификации завода "Этилен-450" ОАО "Нижнекамскнефтехим".

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$[B]$  – матрица коэффициентов массоотдачи  $[\text{кг-моль}/\text{м}^2\text{час}]$ ;  $E$  – доля отгона паровой фазы;  $F$  – площадь контакта фаз,  $[\text{м}^2]$ ;  $G, L$  – поток пара и ж-ти,  $[\text{кг-моль}/\text{час}]$ ;  $h, H$  – удельная энтальпия жидкой и паровой фаз,  $[\text{кДж}/\text{кг-моль}]$ ;  $I$  – энергия одного или нескольких потоков,  $[\text{кДж}]$ ;  $K$  – коэффициент фазового равновесия;  $K'_i$  – коэффици-

ент пропорциональности, [%];  $V$  – массовые потоки через границу раздела фаз [кг-моль/м<sup>2</sup>час];  $P$  – давление, [мм.рт.ст., МПа];  $q, Q$  – энергия жидкой и паровой фаз, [кДж];  $\Delta Q$  – тепло, переданное в результате теплообмена, [кДж];  $t, T$  – температура [°C];  $T_d, T_{II}$  – время дифференцирования и интегрирования,  $\Delta T$  – период регулирования АСР, [сек.];  $V$  – объем, [м<sup>3</sup>];  $w, W$  – удерживающие способности по жидкости и по пару, [кг-моль];  $x, y$  – мольные доли компонента в жидкости и паре;  $X$  – выходные сигналы регулятора, [%];  $Y$  – отклонение от задания на входе регулятора, [%];  $Z$  – суммарное количество ПЖС на контактном элементе, [кг-моль];  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, [Вт/м<sup>2</sup>\*°К];  $\gamma$  – параметр адаптации выходной позиции регулятора;  $\eta''$  – эффективность массообмена;  $\eta'$  – эффективность теплообмена;  $\tau$  – время,  $\Delta t$  – шаг интегрирования, [сек]. Индексы:  $f$  – граница раздела фаз;  $i$  – индекс компонента;  $j, k$  – входной и выходной потоки;  $m$  – число отсчетов по времени;  $n, N$  – число компонентов в системе;  $x, y$  – жидкая и паровая фазы;  $\kappa, n, *$  – конечное, начальное и равновесное состояния.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Теляков Э.Ш., Бикмурзин А.Р., Тукманов Д.Г., Мулюков К.А. Математическое моделирование динамики многокомпонентной ректификации в сложных агрегатах. – Вестник Академии: Информатика, Экология, Экономика / РАДСИ. – М., 1999, т.3, с. 154-160.

2. Теляков Э.Ш., Тукманов Д.Г., Бикмурзин А.Р., Закиров М.А. Программная реализация математической модели ректификационных объектов химической технологии. – Вестник Академии: Информатика, Экология, Экономика / РАДСИ. – М., 1999, т.3, с. 166-176.

3. Тукманов Д.Г., Теляков Э.Ш., Бикмурзин А.Р., Гайнуллин М.Г. Математическое моделирование динамики многокомпонентной ректификации. – Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-12: сб.трудов Международн. научн. конф. В 5-ти т. Т.2 – Великий Новгород: Новгород.гос.ун-т, 1999, с.29-32.

4. Бикмурзин А.Р., Тукманов Д.Г., Теляков Э.Ш., Мулюков К.А. Идентификация модели динамики ректификации по продолжительности квазистационарного периода. – Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-12: сб.трудов Международн. научн. конф. В 5-ти т. Т.4 – Великий Новгород: Новгород.гос.ун-т, 1999, с.85-87.

5. Бикмурзин А.Р., Тукманов Д.Г., Теляков Э.Ш., Блинов В.Ф., Закиров М.А. Методика определения контрольных тарелок ректификационных колонн в контурах регулирования по косвенным параметрам. – В сб.: "Методы кибернетики химико-технологических процессов" ("КХТП-V-99"). – Казань: КГТУ, 1999, с.102-103.

6. Бикмурзин А.Р., Тукманов Д.Г., Теляков Э.Ш., Мулюков К.А. Оптимизация процедуры расчета динамики ректификации. – В сб.: "Методы кибернетики химико-технологических процессов" ("КХТП-V-99"). – Казань: КГТУ, 1999, с.103-105.

200

7. Тукманов Д.Г., Теляков Э.Ш., Блинов В.Ф., Бикмурзин А.Р., Закиров М.А. Исследование чувствительности ректификационных колонн к внешним возмущениям и определение контрольных тарелок. - В сб. V-я конференция по интенсификации нефтехимических процессов "Нефтехимия-99" – Нижнекамск. 1999. т.2. с. 199-201.

8. Тукманов Д.Г., Теляков Э.Ш., Бикмурзин А.Р., Мулюков К.А., Хоменко А.А. Исследование динамических характеристик ректификационных колонн. – В сб. "Тепло- и массообмен в химической технологии". – Казань: КГТУ, 2000. с. 171-172.

9. Бикмурзин А.Р., Хоменко А.А., Тукманов Д.Г., Теляков Э.Ш. Компьютерное моделирование процессов и аппаратов нефтехимических производств. - В сб. "Тепло- и массообмен в химической технологии". – Казань: КГТУ, 2000, с. 110-111.

Соискатель



А.Р.Бикмурзин

Заказ 138

Тираж 100 экз.

Издательство Казанского государственного технологического университета  
Офсетная лаборатория Казанского государственного технологического университета  
420015, Казань, К.Маркса. 68